

ОБРАЗОВАНИЕ МАССИВНЫХ ЗВЕЗД

И. И. Зинченко

*Институт прикладной физики РАН, Нижегородский
государственный университет им. Н. И. Лобачевского*

Обсуждаются результаты наблюдательных и теоретических исследований процесса образования массивных звезд. В частности, приводятся данные о наблюдавшихся недавно вспышках светимости таких объектов, которые свидетельствуют об эпизодах дисковой аккреции. Рассматриваются вопросы индуцированного звездообразования.

HIGH MASS STAR FORMATION

I. I. Zinchenko

*Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences,
Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod*

The results of observational and theoretical studies of the formation of massive stars are discussed. In particular, data are provided on recently observed bursts of luminosity of such objects, which indicate episodes of disk accretion. The issues of induced star formation are considered.

Введение

Массивными считаются звезды с массой $\gtrsim 8$ масс Солнца [1]. Эти звезды играют очень большую роль в эволюции межзвездной среды и галактик в целом. Время жизни их сравнительно невелико. Многие из них заканчивают свою эволюцию вспышкой сверхновой. Такие вспышки сильно влияют на состояние и динамику межзвездного газа, а также обогащают межзвездную среду тяжелыми элементами. В то же время пока нет достаточного понимания того, как такие звезды образуются. Теоретические проблемы связаны, в частности, с тем, что эти звезды начинают оказывать сильное влияние на окружающее вещество еще в процессе набора массы, поскольку ядерные

реакции в них начинаются довольно рано. Наблюдения же затрудняются тем обстоятельством, что таких звезд мало и они находятся далеко от нас.

Наблюдения

Области образования массивных звезд имеют сложную пространственно-кинематическую структуру и содержат разнообразные компоненты: молекулярный газ, нейтральный атомарный газ, ионизованный газ, пыль, а также звезды и протозвезды на разных стадиях эволюции. Исследования этих компонент требуют проведения наблюдений в различных диапазонах длин волн — от сравнительно низкочастотного радиодиапазона, где излучает ионизованный газ, до оптического и ультрафиолетового диапазонов, в которых изучается излучение звезд. Для этих наблюдений требуется набор инструментов, работающих в указанных диапазонах. Наиболее информативными из них являются миллиметровый и субмиллиметровый диапазоны длин волн, в которые попадают основные важные для диагностики протозвездных облаков линии атомов и молекул. На субмиллиметровых волнах также лежит пик излучения пыли, температура которой в таких облаках составляет $\sim 10\text{--}30$ К. Возможности наблюдений на этих волнах значительно возросли с вводом в строй антенной решетки ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) в Чили. Очень много важной информации было получено благодаря космическим аппаратам *Spitzer* [2, 3], *Herschel* [4], Wide Field Infrared Survey Explorer — WISE [5] и др. Ожидаемый в конце 20-х гг. запуск космической обсерватории «Миллиметрон» [6, 7] позволит получить новую ценную информацию об этих объектах.

В коротком обзоре невозможно описать полученные к настоящему времени результаты. Большая часть из них суммирована в нескольких обзорах (например, [1, 8–11]). В качестве примера многоволнового исследования области образования массивных звезд можно привести наши работы по изучению комплекса S254–S258 [12–19]. Одним из самых интересных результатов последнего времени явилось обнаружение вспышки светимости в различных диапазонах длин волн у находящегося в этом комплексе массивного протозвездного объекта с массой около $20 M_{\odot}$ S255 NIRS3 [20–23]. Подобное явление было зарегистрировано и в другом массивном протозвездном объекте — NGC6334I-MM1 [24].

Вероятные сценарии образования массивных звезд

Механизм образования массивных звезд до сих пор неясен и активно обсуждается (например, [1, 10]). Основные обсуждаемые модели — это монолитный коллапс массивного плотного ядра и так называемая конкурентная аккреция. Предлагаются также довольно экзотические модели, в которых массивные звезды образуются путем слияния звезд меньшей массы [25].

Имеется много наблюдений так называемых дозвездных ядер небольшой массы, в которых образуются звезды с массой порядка солнечной. Ряд работ был нацелен на поиск массивных дозвездных ядер (с массой $\sim 30 M_{\odot}$ в радиусе 0.03 пк), которые могли бы сформировать массивную протозвезду. Обнаружение таких ядер явилось бы аргументом в поддержку модели монолитного коллапса при образовании массивных звезд. Однако к настоящему времени удалось обнаружить всего лишь несколько кандидатов в такие ядра [26], при этом неясно, действительно ли они таковыми являются.

Как отмечено выше, недавно были зарегистрированы два события, которые свидетельствуют в пользу дисковой аккреции как механизма образования звезд с массой по крайней мере до $\sim 20 M_{\odot}$. Это вспышки светимости в объектах S255 NIRS3 [20–23] и NGC6334I-MM1 [24]. Подобные вспышки хорошо известны у звезд небольшой массы, но у массивных протозвезд наблюдались впервые. Эти явления хорошо соответствуют модели эпизодической дисковой аккреции [27], в которой массивный протозвездный диск фрагментирует и образовавшиеся фрагменты время от времени падают на протозвезду, вызывая вспышки светимости.

Процесс образования звезд, в том числе массивных, может запускаться какими-то внешними воздействиями. Такие триггерные механизмы рассматриваются с давних пор [28]. Как правило, они связаны с действием ударных волн, которые сжимают межзвездный газ, создавая условия для развития гравитационной неустойчивости. Широко обсуждаемым вариантом является такой процесс в оболочках расширяющихся областей ионизованного водорода (например, [29]). Возможным сценарием являются столкновения облаков (например, [30]). Имеются наблюдения в поддержку такой модели (например, [31, 32]).

Закключение

Процесс образования массивных звезд весьма сложен для теоретического описания, поскольку необходим учет воздействия формирующейся звезды на окружающее вещество. Наблюдательные исследования затрудняются в связи с редкостью и удаленностью областей образования массивных звезд. Тем не менее новое поколение астрономических инструментов позволяет уже довольно детально изучать этот процесс. Последние результаты указывают, в частности, на важную роль эпизодической дисковой аккреции в образовании массивных звезд.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 18-02-00660.

Библиографические ссылки

1. *McKee C. F., Ostriker E. C.* Theory of Star Formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45. — P. 565–687. 0707.3514.
2. *Benjamin R. A., Churchwell E., Babler B. L. et al.* GLIMPSE. I. An SIRTf Legacy Project to Map the Inner Galaxy // *Publ. Astron. Soc. Pac.* — 2003. — Vol. 115. — P. 953–964. astro-ph/0306274.
3. *Carey S. J., Noriega-Crespo A., Price S. D. et al.* MIPS GAL: A Survey of the Inner Galactic Plane at 24 and 70 microns, Survey Strategy and Early Results // *American Astronomical Society Meeting Abstracts : Bulletin of the American Astronomical Society.* — 2005. — Vol. 37. — P. 1252.
4. *Pilbratt G. L., Riedinger J. R., Passvogel T. et al.* Herschel Space Observatory. An ESA facility for far-infrared and submillimetre astronomy // *Astron. Astrophys.* — 2010. — Vol. 518. — P. L1. 1005.5331.
5. *Wright E. L., Eisenhardt P. R. M., Mainzer A. K. et al.* The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance // *Astron. J.* — 2010. — Vol. 140. — P. 1868–1881. 1008.0031.
6. *Smirnov A. V., Baryshev A. M., Pilipenko S. V. et al.* Space mission Millimetron for terahertz astronomy // *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series.* — 2012. — Vol. 8442.
7. *Kardashev N. S., Novikov I. D., Lukash V. N. et al.* Review of scientific topics for the Millimetron space observatory // *Physics Uspekhi.* — 2014. — Vol. 57, № 12. — P. 1199–1228. 1502.06071.
8. *Zinnecker H., Yorke H. W.* Toward Understanding Massive Star Formation // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* — 2007. — Vol. 45, № 1. — P. 481–563. 0707.1279.

9. *Krumholz M. R., Klein R. I., McKee C. F. et al.* The Formation of Massive Star Systems by Accretion // Science. — 2009. — Vol. 323, № 5915. — P. 754. 0901.3157.
10. *Tan J. C., Beltrán M. T., Caselli P. et al.* Massive Star Formation // Protostars and Planets VI. — 2014. — P. 149–172. 1402.0919.
11. *Motte F., Bontemps S., Louvet F.* High-Mass Star and Massive Cluster Formation in the Milky Way // Ann. Rev. Astron. Astrophys. — 2018. — Vol. 56. — P. 41–82. 1706.00118.
12. *Ojha D. K., Samal M. R., Pandey A. K. et al.* Star Formation Activity in the Galactic H II Complex S255-S257 // Astrophys. J. — 2011. — Vol. 738. — P. 156. 1106.1858.
13. *Zinchenko I., Liu S.-Y., Su Y.-N. et al.* A Multi-wavelength High-resolution study of the S255 Star-forming Region: General Structure and Kinematics // Astrophys. J. — 2012. — Vol. 755. — P. 177. 1206.5906.
14. *Samal M. R., Ojha D. K., Jose J. et al.* Star formation in the filament of S254-S258 OB complex: a cluster in the process of being created // Astron. Astrophys. — 2015. — Vol. 581. — P. A5.
15. *Zinchenko I., Liu S.-Y., Su Y.-N. et al.* The Disk-outflow System in the S255IR Area of High-mass Star Formation // Astrophys. J. — 2015. — Vol. 810. — P. 10. 1507.05642.
16. *Zinchenko I., Liu S.-Y., Su Y.-N., Sobolev A. M.* Detection of a new methanol maser line with ALMA // Astron. Astrophys. — 2017. — Vol. 606. — P. L6. 1709.08889.
17. *Zemlyanukha P. M., Zinchenko I. I., Salii S. V. et al.* The Spatial-Kinematic Structure of the Region of Massive Star Formation S255N on Various Scales // Astronomy Reports. — 2018. — Vol. 62, № 5. — P. 326–345. 1805.02465.
18. *Zinchenko I., Liu S., Su Y., Wang Y.* Disks and outflows in the S255IR area of high mass star formation from ALMA observations // Research in Astronomy and Astrophysics. — 2018. — Vol. 18. — P. 093.
19. *Ryabukhina O. L., Zinchenko I. I., Samal M. R. et al.* Study of the filamentary infrared dark cloud G192.76+00.10 in the S254-S258 OB complex // Research in Astronomy and Astrophysics. — 2018. — Vol. 18. — P. 095.
20. *Caratti O Garatti A., Stecklum B., Garcia Lopez R. et al.* Disk-mediated accretion burst in a high-mass young stellar object // Nature Physics. — 2017. — Vol. 13. — P. 276–279. 1704.02628.
21. *Moscadelli L., Sanna A., Goddi C. et al.* Extended CH₃OH maser flare excited by a bursting massive YSO // Astron. Astrophys. — 2017. — Vol. 600. — P. L8.

22. *Szymczak M., Olech M., Wolak P. et al.* Giant burst of methanol maser in S255IR-NIRS3 // *Astron. Astrophys.* — 2018. — Vol. 617. — P. A80. 1807.07334.
23. *Liu S., Su Y., Zinchenko I. et al.* A Submillimeter Burst of S255IR SMA1: The Rise and Fall of Its Luminosity // *Astrophys. J.* — 2018. — Vol. 863. — P. L12. 1808.02192.
24. *Hunter T. R., Brogan C. L., MacLeod G. et al.* An Extraordinary Outburst in the Massive Protostellar System NGC6334I-MM1: Quadrupling of the Millimeter Continuum // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 837, № 2. — P. L29. 1701.08637.
25. *Bonnell I. A., Bate M. R., Zinnecker H.* On the formation of massive stars // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1998. — Vol. 298. — P. 93–102. [arXiv:astro-ph/9802332](#).
26. *Louvet F.* Review on high-mass star formation // SF2A-2018: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics. — 2018. — P. Di.
27. *Meyer D. M.-A., Vorobyov E. I., Kuiper R., Kley W.* On the existence of accretion-driven bursts in massive star formation // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 2017. — Vol. 464. — P. L90–L94. 1609.03402.
28. *Elmegreen B. G., Lada C. J.* Sequential formation of subgroups in OB associations. // *Astrophys. J.* — 1977. — Vol. 214. — P. 725–741.
29. *Deharveng L., Zavagno A., Caplan J.* Triggered massive-star formation on the borders of Galactic H II regions. I. A search for “collect and collapse” candidates // *Astron. Astrophys.* — 2005. — Vol. 433, № 2. — P. 565–577. [astro-ph/0412602](#).
30. *Whitworth A. P., Bhattal A. S., Chapman S. J. et al.* The Preferential Formation of High-Mass Stars in Shocked Interstellar Gas Layers // *Mon. Not. R. Astron. Soc.* — 1994. — Vol. 268. — P. 291.
31. *Dewangan L. K., Ojha D. K., Zinchenko I.* New Insights in the Mid-infrared Bubble N49 Site: A Clue of Collision of Filamentary Molecular Clouds // *Astrophys. J.* — 2017. — Vol. 851, № 2. — P. 140. 1711.06412.
32. *Dewangan L. K., Ojha D. K., Zinchenko I., Baug T.* Cloud-Cloud Collision-induced Star Formation in IRAS 18223-1243 // *Astrophys. J.* — 2018. — Vol. 861, № 1. — P. 19. 1805.07305.